

Энергетика

УДК 681.516.73+621.365

СИНТЕЗ СИСТЕМЫ МОДАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ МНОГОСЕКЦИОННЫМ ИНДУКЦИОННЫМ НАГРЕВАТЕЛЕМ НЕФТИ¹

М.А. Гусева

Самарский государственный технический университет
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

В работе рассматривается задача синтеза системы модального управления объектом с распределенными параметрами на примере индукционной установки по нагреву нефти с учетом ограничений на пространственную конфигурацию теплоисточников. Ставится задача по поддержанию температуры стенки нагревателя на предельно допустимом уровне, температурное распределение потока нефти учитывается как возмущение. Приведены результаты численных экспериментов полученной системы.

Ключевые слова: индукционный нагрев, нагрев потока жидкости, объект с распределенными параметрами, система модального управления.

Транспортировка высоковязких нефтей в северных районах затруднена в связи с изменяющимися реологическими свойствами нефти при низких температурах. При перекачке подобных жидкостей необходим подогрев. Параметры потока (температура, расход) могут меняться в процессе эксплуатации трубопровода в зависимости от внешних условий, поэтому установка подогрева нефти должна оснащаться системой управления, обеспечивающей автоматическое поддержание желаемых параметров ее работы. Исследуемая конструкция индукционной установки по подогреву нефти [1] представлена на рис. 1.

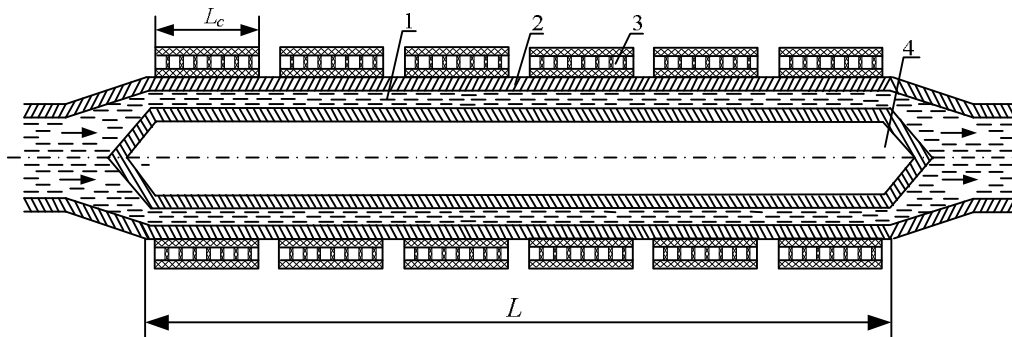


Рис. 1. Упрощенная схема многосекционного индукционного нагревателя нефти:
1 – нефть; 2 – труба; 3 – индуктор; 4 – расширитель.
 L_c – длина одной секции индукционного нагревателя, L – длина трубы

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ №10-08-00754-а, АВЦП «Развитие научного потенциала высшей школы (2009-2011 годы)» №2.1.2/13988.

Мария Александровна Гусева, аспирант, каф. автоматики и управления в технических системах.

Нагреватель представляет собой теплообменный аппарат, в который для увеличения площади соприкосновения жидкости с поверхностью нагрева установлен осесимметричный расширитель 4. Жидкость нагревается за счет конвективного теплообмена со стенками труб, нагрев которых, в свою очередь, осуществляется с помощью многосекционного индукционного нагревателя. Индукционный нагрев обладает рядом преимуществ по сравнению с традиционными методами: высокая скорость и точность нагрева, сниженные энергозатраты [1, 2].

Процесс теплообмена между стенкой трубы и ламинарным потоком нефти может быть описан системой дифференциальных уравнений в частных производных:

$$\frac{\partial T_{st}(x,t)}{\partial t} - a \cdot \frac{\partial^2 T_{st}(x,t)}{\partial x^2} = \frac{1}{c \cdot \gamma} \cdot F(x,t) + \beta_1 \cdot (T_{fl}(x,t) - T_{st}(x,t)); \quad (1)$$

$$\frac{\partial T_{fl}(x,t)}{\partial t} + v \cdot \frac{\partial T_{fl}(x,t)}{\partial x} = \beta_2 \cdot (T_{st}(x,t) - T_{fl}(x,t)); \quad (2)$$

$$0 \leq x \leq L, \quad t > 0, \quad a \neq 0$$

с граничными и начальными условиями:

$$T_{fl}(0,t) = g(t), \quad T_{fl}(x,0) = T_{fl_0}(x) = 0,$$

$$\left. \frac{\partial T_{st}(x,t)}{\partial x} \right|_{x=0} = g_1(p) = 0, \quad \left. \frac{\partial T_{st}(x,t)}{\partial x} \right|_{x=L} = g_2(p) = 0,$$

$$T_{st}(x,0) = T_{st_0}(x) = 0,$$

где $T_{st}(x,t)$ – распределение температуры стенки трубы по длине, град; $F(x,p)$ – мощность внутреннего тепловыделения (индукционный нагрев), $Вт/м^3$; $T_{fl}(x,t)$ – распределение температуры потока жидкости по длине, град; v – скорость потока жидкости, $м/с$; β_1, β_2 – приведенные коэффициенты конвективного теплообмена стенки с потоком и потока со стенкой, $1/с$; $a = \lambda/(c \cdot \gamma)$ – коэффициент температуропроводности, $м^2/с$; λ – теплопроводность, $Вт/(м \cdot град)$; c – удельная теплоемкость материала, $Дж/(кг \cdot град)$; γ – плотность, $кг/м^3$; L – длина нагревателя, $м$.

Режим течения потока нефти принят ламинарным, значения скорости и коэффициентов приведенного теплообмена постоянны по всей длине трубы.

Распределенная передаточная функция температуры стенки нагревателя имеет вид [3, 4]

$$W_{st}(x, \xi, p) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\varphi_n(x) \cdot \varphi_n(\xi)}{p + \left(\beta_1 + an^2 \pi^2 / L^2 \right)}, \quad (3)$$

где p – оператор преобразования по Лапласу; $\varphi_n(x)$ – собственные функции решения задачи (1) с граничными условиями второго рода:

$$\varphi_n(x) = \begin{cases} \sqrt{1/L}, & n = 0; \\ \sqrt{2/L} \cdot \cos(n\pi x / L), & n = 1, 2, \dots, N. \end{cases}$$

Распределенная передаточная функция температуры потока нефти

$$W_{fl}(x, \xi, p) = 1(x - \xi) \cdot \frac{1}{v} \cdot \exp \left[-\frac{p + \beta_2}{v} \cdot (x - \xi) \right], \quad (4)$$

где $1(x - \xi)$ – единичная функция:

$$1(x - \xi) = \begin{cases} 0, & \text{при } x \leq \xi, \\ 1, & \text{при } x > \xi. \end{cases}$$

Взаимное влияние температурных полей стенки и потока жидкости, неоднородные начальные и граничные условия учитываются с помощью стандартизирующих функций:

$$\omega_{st}(x, p) = \frac{F(x, p)}{c \cdot \gamma} + \beta_1 \cdot T_{fl}(x, p) + T_{st0}(x) - a \cdot \delta(x) \cdot g_1(p) + a \cdot \delta(L - x) \cdot g_2(p), \quad (5)$$

$$\omega_{fl}(x, p) = \beta_2 \cdot T_{st}(x, p) + T_{fl0}(x) + v \cdot \delta(x) \cdot g(p), \quad (6)$$

которые используются для расчета температурного распределения стенки трубы и потока жидкости соответственно с помощью выражений [3]:

$$T_{st}(x, p) = \int_0^L W_{st}(x, \xi, p) \cdot \omega_{st}(\xi, p) d\xi. \quad (7)$$

$$T_{fl}(x, p) = \int_0^L W_{fl}(x, \xi, p) \cdot \omega_{fl}(\xi, p) d\xi. \quad (8)$$

Конструктивные ограничения на пространственную конфигурацию распределения мощности теплоисточников задаются с помощью функции $F(x, p)$. Многосекционный индукционный нагреватель состоит из шести секций нагрева. Каждая секция нагрева формирует теплоисточники на участке $[b_{nj}; b_{kj}]$ с мощностью, определяемой сосредоточенным сигналом $q_j(p)$, $j \in \{1; 6\}$, поэтому $F(x, p)$ задается в виде

$$F(x, p) = \sum_{j=1}^6 1(x - b_{nj}) \cdot 1(b_{kj} - x) \cdot q_j(p). \quad (9)$$

Тогда стандартизирующая функция (5) с учетом нулевых граничных и начальных условий примет вид:

$$\omega_{st}(x, p) = \sum_{j=1}^6 1(x - b_{nj}) \cdot 1(b_{kj} - x) \cdot \frac{q_j(p)}{c \cdot \gamma} + \beta_1 \cdot T_{fl}(x, p). \quad (10)$$

Структурная схема системы с распределенными параметрами, учитывающая взаимосвязь между температурным распределением стенки и потока, приведена на рис. 2. Прохождение распределенного сигнала через блок соответствует операции интегрирования по области определения пространственной переменной [3].

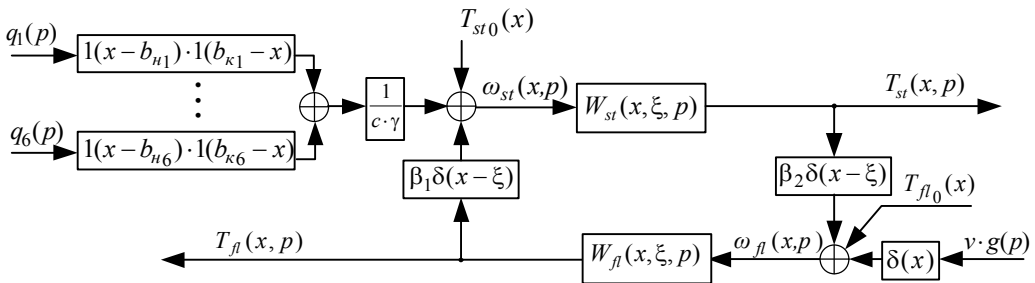


Рис. 2. Структурная схема взаимного влияния температурного распределения стенки и потока нефти

В данной работе ставится задача по поддержанию температурного распределения стенки теплообменного аппарата на предельно допустимом уровне, что соответствует режиму работы теплообменного аппарата с максимальной эффективностью при расчетных параметрах нагреваемого потока. Тогда задача автоматического управления объектом на рис. 2 может быть сформулирована следующим образом. Необходимо обеспечить такие значения мощностей секций индукционного нагревателя, при которых желаемое температурное распределение стенки нагревателя будет соответствовать заданному $T_{st}^*(x, p)$.

Поиск выражения для передаточной функции замкнутой системы с распределенными параметрами по каналам $q_j(p) - T_{st}(x, p)$ приводит к необходимости решения интегрального уравнения Фредгольма второго рода [3], точное решение которого для исследуемой системы не может быть найдено. Поэтому в работе предлагается реализовать систему модального управления температурным распределением стенки нагревателя, а температурное распределение потока учитывать при моделировании системы как неизмеряемое возмущение. Получение желаемого температурного распределения достигается путем изменения мощности нагревателей по длине трубы $q_j(p)$ (см. рис. 2).

Температурное распределение стенки может быть представлено разложением по собственным функциям в бесконечный сходящийся ряд [5]:

$$T_{st}(x, p) = \sum_{i=0}^{\infty} \varphi_i(x) \cdot T_i(p). \quad (11)$$

Представление распределенного сигнала в виде суммы произведений временной и пространственной мод позволяет использовать модальный регулятор в системе управления температурным распределением стенки по длине (рис. 3). На практике в выражении (11) ограничиваются учетом конечного $(M+1)$ числа мод.

Желаемое температурное распределение $T_{st}^*(x, p)$ сравнивается с фактическим $T_{st}(x, p)$ (рис. 3). Полученный сигнал рассогласования поступает на вход модального анализатора (МА), выходы которого представляют собой временные моды ошибки:

$$\varepsilon_i(p) = \int_0^L \varepsilon(x, p) \cdot \varphi_i(x) dx, \quad i \in \{0, 1, \dots, M\}. \quad (12)$$

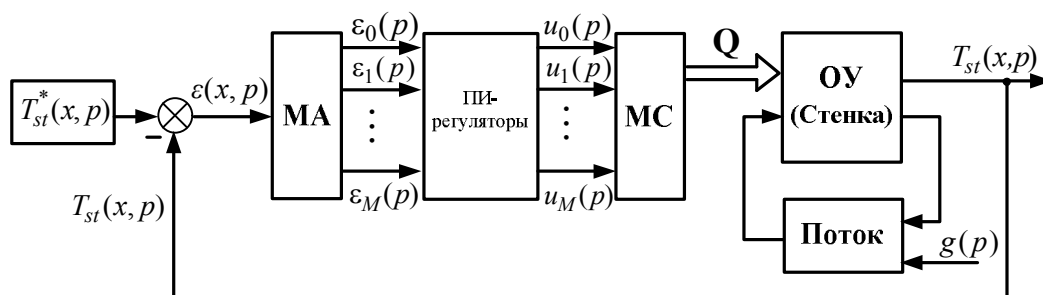


Рис. 3. Структурная схема системы модального управления

Моды сигнала ошибки подаются на входы $(M+1)$ – одномерных ПИ-регуляторов, настроенных на технический оптимум. На выходах регуляторов формируются сигналы управления $u_i(p)$.

мируются управляющие воздействия $u_i(p)$ для выбранного числа $(M+1)$ мод объекта.

В работе [6] проводилось исследование модального представления рассматриваемого объекта при ограничениях на конфигурацию распределения теплоисточников и были предложены выражения для количественной оценки влияния управляющих воздействий по отдельным модам объекта друг на друга. Анализ взаимного влияния мод для нагревателя, состоящего из шести одинаковых секций нагрева, выявил определенную закономерность: первые шесть временных мод управляющих воздействий влияния друг на друга не оказывают. Седьмая мода является неуправляемой, а учет при управлении числа мод больше семи приводит к появлению паразитных связей с другими модами и не позволяет осуществлять регулирование модами высокого порядка. Поэтому для управления в системе были учтены первые шесть мод разложения в ряд (11), $(M+1)=6$.

Сигналы $u_i(p)$ поступают на модальный синтезатор (МС), который формирует необходимое управляющее воздействие $q_j(p)$ на участке $[b_{n_j}, b_{k_j}]$:

$$q_j(p) = \frac{1}{L_c} \cdot \sum_{i=0}^5 u_i(p) \cdot \int_{b_{n_j}}^{b_{k_j}} \varphi_i(x) dx, \quad j \in \{1, 2, \dots, 6\}. \quad (13)$$

$\mathbf{Q} = [q_1(p) \quad q_2(p) \quad \dots \quad q_6(p)]^T$ – вектор управляющих воздействий.

Исследование модального регулятора проводилось с использованием численной модели системы, где взаимное влияние температурных распределений стенки $T_{st}(x, p)$ и потока учтено с помощью методики пространственной аппроксимации распределенного сигнала. Данная методика позволяет аппроксимировать распределенный сигнал различными способами: полиномиальной зависимостью [7, 8], разложением в ряд по ортонормированному базису и т. д.

При построении системы модального управления (см. рис. 3) обратная связь по распределенному сигналу на практике является нереализуемой, поскольку невозможно полное измерение состояния распределенного объекта управления. Сигнал ошибки вычисляется с использованием обратных связей по температуре в различных точках по длине стенки. С учетом конструктивных особенностей установки по подогреву нефти датчики температуры стенки нагревателя будут размещаться между секциями нагревателя, а также перед первой и за последней секциями. Тогда временные моды сигнала ошибки могут быть получены из решения системы [9]

$$\varepsilon(x_m, p) = T_{st}^*(x_m, p) - T_{st}(x_m, p) = \sum_{i=0}^5 \varphi_i(p) \cdot \varepsilon_i(p), \quad m \in \{1, 2, \dots, 7\}, \quad (14)$$

которая может быть решена методом квазиобращений.

В данной работе при исследовании системы модального управления желаемая температура стенки трубы была установлена на уровне 120 градусов, так чтобы температура потока нефти не превышала 90 градусов, что обусловлено технологией перекачки высоковязких нефтей. В численно-аналитических моделях для стенки и потока использовались теплофизические параметры для стали и нефти. Длина теплообменного аппарата $L=6,36$ м; длина одной секции $L_c=1$ м.

В процессе исследования системы модального управления входная температура потока была скачкообразно изменена с 20 до 30 градусов. Значения температур в семи точках на выходе стенки в разные моменты времени – установившийся режим

до подачи возмущения, установившийся режим после подачи возмущения, во время максимального температурного отклонения двух режимов – представлены в таблице.

Отклонение температуры от заданного значения 120 градусов (см. таблицу) обусловлено учетом конечного числа мод при синтезе модального регулятора и остается в пределах одного градуса, что отвечает техническим требованиям.

| Момент времени | Значения температуры в семи точках по длине стенки, град | | | | | | |
|----------------------------|--|--------|--------|--------|--------|---------|--------|
| До возмущения | 119,54 | 120,83 | 119,21 | 120,83 | 119,13 | 120,832 | 119,63 |
| Максимальное отклонение | 119,85 | 120,64 | 119,34 | 120,72 | 119,23 | 120,74 | 119,64 |
| После нанесения возмущения | 119,6 | 120,75 | 119,26 | 120,75 | 119,23 | 120,75 | 119,64 |

Графики вектора управляющих воздействий Q представлены на рис. 4. Возмущение нанесено в момент времени 100 секунд, до нанесения возмущения объект находился в установившемся режиме. Порядковые номера кривых на рис. 4 соответствуют номеру индукционных нагревателей на поверхности трубы (см. рис. 1).

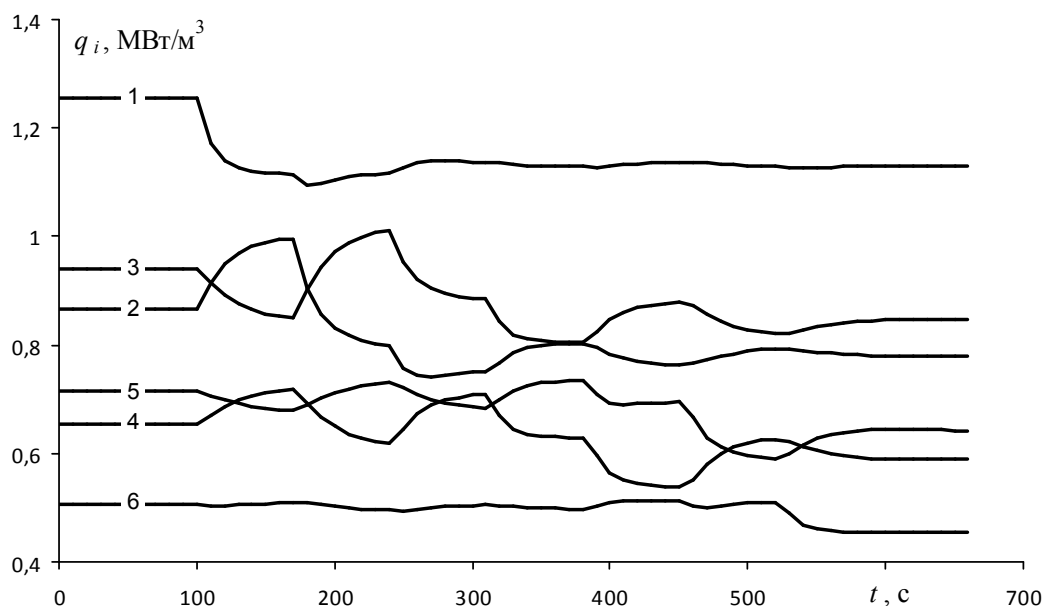


Рис. 4. Графики управляющих воздействий по шести индукционным нагревателям

Моменты резкого изменения характера графиков функций на рис. 4 обусловлены моментами достижения потоком очередного датчика температуры.

Проведенный анализ полученных результатов выявил высокое качество системы в динамике, которое позволяет выполнить технологические требования, предъявляемые к исследуемому объекту.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Данилушкин В.А., Калашиников С.А., Шумаков М.А. Применение индукционных нагревателей в трубопроводном транспорте высоковязких нефтей // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. Вып. 14. Самара, 2002. – С. 178-181.
2. Данилушкин В.А. Разработка и исследование индукционных установок косвенного нагрева в технологических комплексах транспортировки нефти: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.09.10 / Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2004. – 20 с.
3. Бутковский А.Г. Структурная теория распределенных систем. – М.: Наука, 1977.
4. Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел. – М.: Наука, 1964. – 488 с.
5. Рапопорт Э.Я. Структурное моделирование объектов и систем управления с распределенными параметрами: Учеб. пособие / Э.Я. Рапопорт. – М.: Высш. шк., 2003. – 299 с.
6. Гусева М.А. Исследование модального представления объекта при ограничениях на конфигурацию распределенного управления // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. Вып. 3(31). Самара, 2011. – С. 225-227.
7. Гусева М.А., Данилушкин И.А. Применение пространственной аппроксимации распределенных сигналов при моделировании теплообменных аппаратов // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. Вып. 7(28). Самара, 2010. – С. 151-157.
8. Данилушкин И.А., Гусева М.А. Структура системы модального управления теплообменным аппаратом // Моделирование и оптимизация динамических систем и систем с распредел. параметрами. Труды 8-й Всерос. науч. конф. с международ. участ. – Самара: СамГТУ, 2011. – С. 44-47.
9. Рэй У. Методы управления технологическими процессами. Пер. с англ. – М.: Мир, 1983. – 368 с.

Статья поступила в редакцию 28 сентября 2011 г.

SYNTHESIS OF MODAL CONTROL SYSTEM OF OIL MULTISECTION HEATER

M.A. Guseva

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100

A problem of synthesis of modal control system of an object with the distributed parameters is considered. An induction heater of an oil flow is used as a control plant. There are taking into account restrictions of spatial configuration of heat sources. A problem of temperature maintenance in the heater wall at maximum allowable level is solved. The oil flow temperature distribution is considered as a disturbance. Simulation results of created system are mentioned.

Keywords: *induction heating, heating of liquid flow, object with the distributed parameters, modal control system.*